

强夯置换加固处理软地基

马连成, 张志强, 宋士兵

(青岛地矿岩土工程有限公司, 山东 青岛 266071)

摘 要:介绍了强夯置换软地基处理施工工艺、检测方法以及复合地基承载力计算结果, 并对加固效果进行了对比。

关键词:强夯置换; 软地基; 加固; 复合地基; 承载力

中图分类号:TU472.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2007)S1-0210-05

强夯置换地基加固处理方法在强夯的基础上很快发展起来, 2002 年纳入国家行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002), 作为有效的地基处理方法之一, 已经在很多行业广泛使用, 取得了很好的经济效益和社会效益。

根据施工的强夯置换工程, 我们选择软弱地层较厚的、具有特殊性和代表性的海相沉积土强夯置换工程项目进行探讨。通过对整个工程施工全过程的跟踪监测和多项试验, 对强夯置换地基处理的设计理论、技术要求、施工方案、试验检测以及处理效果等进行综合论述。

1 工程地质地层情况

本强夯置换地基加固处理工程, 场区内地层自上而下分为:

①最近回填的碎石土, 含有大量的碎石块和中粗砂, 厚度为 2.0~3.0 m, 平均厚度 2.5 m;

②淤泥质、粉质粘土与粉细砂互层, 场区内分布均匀, 粉细砂以薄层形式出现, 厚度 3.5~8.5 m, 标高 0.08~0.30 m, 物理力学性质很差, 标准贯入试验击数平均值 2 击, 重型动力触探击数平均值 1.2 击;

③淤泥质、粉质粘土, 该层揭露厚度 3.0~3.6 m, 平均厚度 3.4 m, 层底标高 -2.10~-2.60 m, 标准贯入试验击数平均值 1.0 击, 重型动力触探击数平均值 0.8 击;

④粉质粘土, 物理力学性质较好, 作为强夯置换地基处理夯墩的持力层;

⑤中粗砂, 物理力学性质很好;

⑥粉质粘土, 物理力学性质很好。

场区内强夯置换地基处理重点是②层淤泥质、粉质粘土与粉细砂互层, ③层淤泥质、粉质粘土层, 其特性是成分复杂, 分布广, 埋深变化大, 物理力学性质差, 含水量大, 孔隙比大, 流塑~软塑状态, 承载力很低。

2 强夯置换地基加固处理的内容和技术参数

2.1 技术要求

(1)强夯置换处理后的复合地基容许承载力达到 150 kPa;

(2)强夯置换夯墩的长度一般为 8~11 m;

(3)锤头规格: 质量 20 t, 直径 1.50 m, 高 1.80 m, 底面积 1.54 m², 接地净压力 130 kPa;

(4)落距 20 m, 夯击能为 4000 kN·m;

(5)夯墩间距为 4 m, 采用正方形布点;

(6)填料采用块径 < 50 cm 的石渣;

(7)每夯墩预计夯击数为 20~25 击;

(8)达到最后 2 夯击沉降量 < 0.20 m 为止。

2.2 执行的规范

强夯置换地基加固处理检测和评价执行以下规范:《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2002), 《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002), 《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202-2002), 《建筑工程地质钻探技术标准》(JGJ 87-92)。

2.3 检测和评价内容

(1)夯墩的深度、长度、直径;

(2)墩间地基土的变化情况及有关工程特性指标;

(3)夯墩地基土的承载力;

收稿日期: 2007-05-30

作者简介: 马连成(1948-), 男(汉族), 山东青岛人, 青岛地矿岩土工程有限公司工程研究员, 探矿工程专业, 从事岩土工程设计和施工工作, 山东省青岛市徐州路 79 号。

- (4)强夯置换复合地基的承载力、置换率;
- (5)夯墩的密实度,单夯墩的承载力,沉降模量。

3 强夯置换施工

3.1 施工概况

强夯置换施工严格按照设计的夯击能、锤头落距、夯锤直径、夯锤质量、夯击锤数、夯墩间距等技术要求施工,准确地记录夯墩投石量、投石质量、夯击深度等施工事项。

3.2 基本要求

场区采取隔点跳夯的顺序进行施工,根据地层情况每间隔一个夯点或两个夯点夯成墩后,再夯中间的夯点。夯区夯墩的投石量和夯击数保持基本一致。

避免单夯点一次性夯达设计沉降要求,因为单墩投石量过大,夯击数较多,容易形成“大肚子”。

经过反复对夯击点的夯击,当夯坑达到一定深度时(1.5~2.0 m),装载机填入石渣,填料后再继续夯击,反复回填夯击,直至最后两锤沉降量<20 cm。

3.3 施工工艺流程

施工场地清理平整→测量放线→夯点定位→夯机安装→夯机就位→夯锤提升→夯锤脱钩→落锤强夯→测量沉降→填加石料→再次提锤→反复强夯→沉降达到要求→夯机移位。

3.4 强夯置换使用的特定夯锤

根据地质地层特点采用直径为1.5 m、高1.8 m以上的锤头,底面积小、高度较大的圆柱型锤头,增加锤头质量和静接地压力,提高锤头高度,加大夯击能,增加锤头的穿透力,快速穿透软弱地层,更好地形成密实的夯墩。见图1。

3.5 强夯置换使用的填料

在地基土很软弱的情况下,填料采用各种级配的石料,最大块径50 cm的碎石以及各种级配的石碴和碎石土、较好的石料级配形成碎石骨架,强夯时容易更快地穿过软弱地层,进入持力层,使夯墩密实,挤密墩间的地基土。见图2。

通过强夯置换形成了密实的夯墩体,挤密了地基土,密实的夯墩体和墩间地基土形成了强夯置换复合地基。

4 强夯置换跟踪监测和检测

为了确定夯墩直径、深度,在地基强夯置换加固



图1 强夯使用的锤头



图2 强夯置换使用的碎石填料

处理施工初期,采用面波测试和地震影像测试方法,对工程施工效果进行了跟踪监测和检测工作。查清了夯墩体直径、深度(长度)情况,及时地为施工工艺调整提供了数据。

4.1 夯墩的面波跟踪测试情况

采用面波对试验夯墩进行了0、5、10、15、18、22击跟踪测试。夯墩的深度变化见表1。

通过对夯墩的面波跟踪测试,夯墩变化很明显(参见图3),强夯5击夯墩长度为4.80 m、10击夯墩增加0.90 m、15击夯墩增加0.90 m,底部还有0.70 m的淤泥层,当夯到18击时夯墩底部达到了持力层。夯到22击时碎石墩长度7.2 m,直径1.8 m,墩体横波波速278.6 m/s,持力层横波波速296.2 m/s,碎石墩体达到了中硬土。

强夯置换复合地基经过面波测试,确定了密实夯墩直径、深度和长度。

4.2 强夯过程中夯墩的变化和沉降量情况

强夯置换施工过程中严格按照设计要求施工,作好现场记录。根据现场记录(见表2和图4),在夯击过程中夯墩深度等的变化情况有一定的规律

性。

表1 跟踪检测试验夯墩变化情况统计表

击数/击	深度/m	平均剪切波速/(m·s ⁻¹)	备注
0	0.0~1.3	227.50	打桩前
	1.3~7.3	92.20	
	7.3~10.4	257.50	
5	0.0~4.8	257.50	桩体波速
	4.8~7.3	122.50	淤泥波速
	7.3~10.4	277.50	桩持力层波速
10	0.0~5.7	282.50	桩体波速
	5.7~7.3	130.00	淤泥波速
	7.3~9.8	292.50	桩持力层波速
15	0.0~6.6	315.00	桩体波速
	6.6~7.3	135.00	淤泥波速
	7.3~10.2	305.00	桩持力层波速
18	0.0~7.1	337.50	桩体波速
	7.1~9.8	312.50	桩持力层波速
22	0.0~7.5	351.40	桩体波速
	7.5~11.2	326.30	桩持力层波速

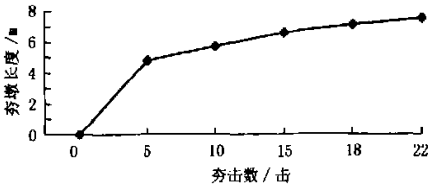


图3 夯墩长度与夯击数关系图

表2 单墩每夯击沉降统计表

序号	沉降值/m	锤击数/击	序号	沉降值/m	锤击数/击
1	1.05	1	14	0.28	14
2	0.97	2	15	0.23	15
3	0.57	3	16	0.825	16
4	0.99	4	17	0.29	17
5	0.41	5	18	0.215	18
6	0.33	6	19	0.19	19
7	1.11	7	20	0.31	20
8	0.3	8	21	0.89	21
9	0.28	9	22	0.27	22
10	1.135	10	23	0.295	23
11	0.285	11	24	0.12	24
12	0.17	12	25	0.195	25
13	0.985	13			

注:落距均为20 m。

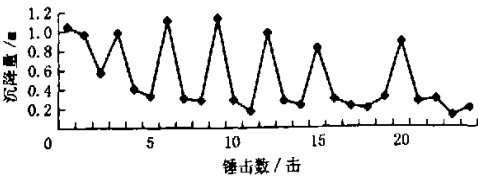


图4 强夯置换锤击数与沉降量关系曲线

通过表2和图4可以看出,在填料级配合理、夯

击能相同的条件下,沉降量变化是有规律的:每前1~2击夯锤沉降量大,然后2~4击沉降量小。整个强夯置换夯锤沉降和夯墩密度变化过程是:2~4击夯墩密实后→1击沉降量大→2~4击夯墩密实后→1击沉降量大,最后夯墩密实挤密四周土达到沉降量的要求。

5 强夯置换对地基土处理效果

强夯置换地基处理是利用特制的强夯锤头,用锤头强大的冲击力将碎石、石块夯成密实的碎石墩体,穿透软弱地层,同时把同体积的地基土挤向四周,密实了地基土,形成密实的夯墩和挤密的地基土共同作用、承载力较高的复合地基。

5.1 面波测试地基土处理效果

通过面波测试跟踪检测对强夯置换前后的地基土处理效果进行对比,观察各测点碎石夯墩体底界面埋深和地基土挤密情况,地基土强夯置换后面波波速测试对比见表3。

表3 地基土强夯置换后面波波速测试对比表

序号	深度/m	平均剪切波速/(m·s ⁻¹)	备注
1号强夯前	0.0~1.5	241.30	回填土波速
	1.5~9.3	135.00	地基土波速
	9.3~12.8	240.00	桩持力层波速
1号强夯后	0.0~8.1	322.50	墩体波速
	8.1~10.7	262.50	墩持力层波速
2号强夯前	0.0~1.8	242.50	回填土波速
	1.8~9.2	125.00	地基土波速
	9.2~11.1	244.80	持力层波速
	11.1~16.0	338.50	
2号强夯后	0.0~8.2	318.60	墩体波速
	8.2~14.0	269.40	墩持力层波速

通过对地基土和夯墩进行物探面波检测,强夯置换地基处理后随夯墩逐渐加深到8.2 m,横波波速135.0 m/s增加到278.6 m/s,夯墩底部进入了持力层,横波波速2.40 m/s。碎石墩体穿过软弱地层达到了中硬土。

5.2 重型动力触探检测地基土处理效果对比

经过强夯置换后由夯墩和挤密的地基土组成的复合地基,采用重型动力触探方法进行检测,检测夯墩墩间土的变化情况和夯墩的深度以及墩底是否到了持力层,重型动力触探检测强夯置换前后地基土的变化情况见图5。

经过强夯置换处理后改变了地基土的物理力学指标,经过重型动力触探检测,锤击数明显增加,承载力有很大的提高。

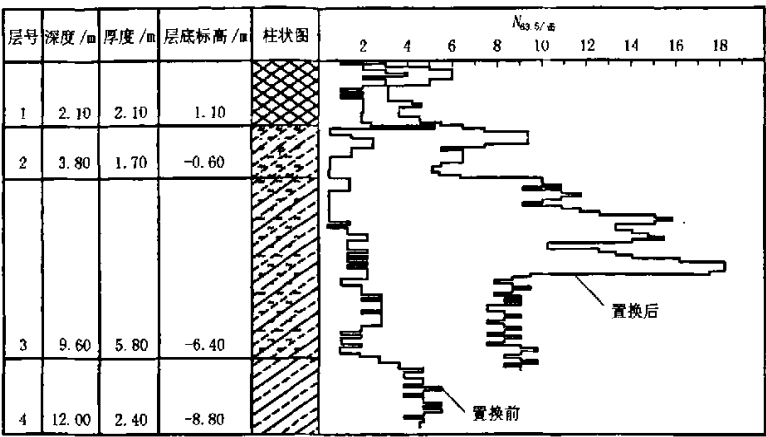


图5 重型动力触探单孔曲线柱状图

6 强夯置换地基处理检测内容和检测结果

强夯置换地基是以密实的夯墩和挤密的地基土组成的复合地基,通过进行静载荷试验,重型动力触探试验、面波测试和地震影像等方法检测夯墩的密实度、直径、深度、长度以及是否进入持力层,确定夯墩间地基土的容许承载力,评价强夯置换处理后复合地基的容许承载力。

6.1 面波测试和地震影像跟踪检测情况

对5个夯墩进行试验,通过面波测试和地震影像跟踪检测,各测点碎石夯墩体底界面埋深介于8.7~9.2 m之间,碎石夯墩体深度均达到设计持力

层;密实碎石墩体横向膨胀系数为1.3~1.5,直径为1.8~2.1 m。

强夯置换地基处理面波测试和地震影像测试夯墩的直径和长度见表4、图6。

表4 面波测试夯墩的直径和长度表

桩号	碎石墩长度/m	碎石墩直径/m	碎石墩体横波波速/(m·s ⁻¹)	横向膨胀系数	碎石墩体持力层横波波速/(m·s ⁻¹)	是否达到持力层
1	8.7	2.1	332.1	1.5	256.2	是
2	9.2	2.1	331.4	1.5	256.1	是
3	8.8	1.8	366.5	1.3	296.2	是
4	8.9	1.8	318.8	1.3	263.6	是

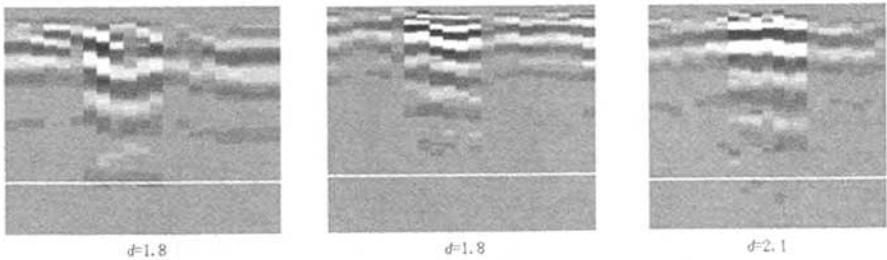


图6 地震影像测试夯墩的直径和长度

强夯置换地基处理,经过对夯墩质量面波测试和地震影像测试,跟踪检测结果,夯墩体的密实情况很好,夯墩的深度和长度达到了持力层,夯墩横向发育很好,夯墩的直径达到1.80~2.10 m以上,满足了设计要求。

6.2 强夯置换复合地基载荷试验概况

为了对强夯置换地基处理后的复合地基作出准确的综合评价,确定静载荷试验点深度及位置,采用几种直径和不同载荷的静载试验方法对夯墩和挤密

的地基土进行检测。

夯墩静载荷检测4组,载荷板面积1.0 m²,检测载荷100 t。结果见表5。地基极限承载力750~1000 kPa。

墩间土静载荷试验4组,试验结果见表6。地基极限承载力500~600 kPa。

6.3 重型动力触探测试夯墩间地基土的承载力

通过对夯墩间地基土的重型动力触探试验结果分析,强夯置换后夯墩间土检测点动力触探锤击数

表5 100 t 夯墩静载荷试验

序号	极限承载力 /kPa	载荷板面积 /m ²	检测 对象	承载力特征值 /kPa
1	1000	1.0	夯墩	500
2	875	1.0	夯墩	437.5
3	750	1.0	夯墩	375
4	1000	1.0	夯墩	500

表6 复合地基的载荷试验表

序号	极限承载力/kPa	对应沉降量/mm	承载力特征值/kPa
1	600	2.6	300
2	600	2.97	300
3	500	7.31	250
4	500	3.65	250

平均4~12击。夯墩间地基土的承载力特征值 f_{sk} 达150 kPa。

6.4 强夯置换复合地基容许承载力评价

根据面积分配法,分别计算复合地基的容许承载力来评价复合地基加固效果。经过多种试验确定了夯墩的承载力和夯墩间地基土的承载力,采用2.2所述规范中的公式计算复合地基承载力:

$$f_{spk} = mf_{pk} + (1-m)f_{sk} \quad (1)$$

$$m = A_p/A \quad (2)$$

式中: f_{spk} ——强夯置换复合地基容许承载力,kPa; f_{pk} ——强夯置换夯墩容许承载力,kPa; f_{sk} ——强夯置换后墩间土的容许承载力,kPa; m ——夯墩和墩间土的面积置换率; A_p ——夯墩的截面积,m²; A ——单个夯墩负担处理面积,m²。

经过静载荷试验等多种测试,强夯置换后夯墩深度(长度)为8.2~9.2 m,夯墩深度(长度)平均为8.6 m;夯墩间地基土的承载力 $f_{sk} = 150$ kPa,复合地基承载力超过150 kPa。强夯置换处理加固地基起到了很好的效果。

7 强夯置换地基处理加固的机理

采用强夯置换地基加固方法,使密实的墩体和挤密的地基土形成了复合地基。在挤密、振实、置换、排水的作用下,改变了原地基土的物理力学性质指标,降低了孔隙比,提高了承载力。

7.1 强夯置换作用

强夯形成了直径较大的密实的碎石墩体置换了

同体积地基土,减少了地基土孔隙,置换率越大复合地基承载力增加越大。

7.2 挤密作用

强夯置换施工过程中,锤头强大的冲击力,对碎石墩体有垂直冲击压力,在形成密实的夯墩的同时把同体积的地基土挤向四周,挤密了墩体周边的土体。

7.3 振密作用

强夯置换的振密作用比较明显,有效范围可达夯墩直径几倍以上。锤头在夯密墩体的同时,强大的冲击力和振动力通过墩体传向地基土,对地层起到振密作用。

振动使土体液化,加快颗粒沉降,使之重新组合排列。振密作用使碎石夯墩体密实,与振密地基土体形成了复合地基,从而较大地改善了地基的承载力。

7.4 固结排水作用

密实的碎石夯墩体形成后,本身又产生一个排水通道,挤密振密过程中,土体产生了孔隙水压力,渐渐向桩体转移,孔隙水压力随休置时间延长不断减弱并消失,使土体排水固结,改善了地基的整体稳定性。

8 结语

强夯置换处理加固地基是利用锤头强大的冲击力,将碎石、石块夯成密实的碎石墩体,同时把同体积的地基土挤向四周,密实了地基土,密实的夯墩和周围挤密的地基土共同作用,形成了承载力较高的强夯置换复合地基。

强夯置换加固地基的处理效果以及深度和夯击能、夯击次数、锤头类型、充填材料、地层条件等等有直接关系。

经过强夯置换处理加固地基后,由夯墩和挤密的地基土组成复合地基,然后在强夯置换复合地基上均匀地回填一层碎石土,采用低夯击能进行普夯,进一步挤密墩间土,加快孔隙水压力的消散,使地基应力均匀,与先回填的碎石土形成一层承载力较高的密实的碎石垫层。